

doi:10.3969/j.issn.1674-8530.13.0160

平移式喷灌机行走速度及喷灌均匀度试验研究

张以升^{1,2}, 朱德兰^{1,2}, 张林¹, 巩兴晖^{1,2}

(1. 西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)



张以升

摘要: 为研究低压喷灌下喷灌机行走速度合理取值以及喷灌均匀度对土壤含水率均匀度的影响,以自行研制的轻小型平移式喷灌机为研究对象,通过室内单喷头试验和田间喷灌试验,探究了特定灌水定额下喷灌机的工作压力与行走速度关系,并对其水量分布、喷灌均匀度以及土壤含水率均匀度随时间变化进行了分析.结果表明:通过确定灌水定额能够计算出平移式喷灌机的行走速度和工作压力;当灌水定额分别为 10, 15, 20 mm 时,40 ~ 120 kPa 喷灌压力下喷灌机行走速度最小为 17.27 m/h,最大为 58.65 m/h;增大喷灌压力能小范围提高均匀度,40 kPa 工作压力均匀度为 0.696,60 ~ 120 kPa 喷灌压力下均匀度变化范围为 0.731 ~ 0.788,喷灌水在土壤中的二次分布均匀度明显高于地表喷灌均匀度,40 kPa 喷灌压力下喷后 6 h 土壤含水率均匀度达到 0.906,24 h 后达到 0.953,可相应降低喷灌均匀度设计值以降低运行成本,节约能耗.

关键词: 轻小型移动式喷灌机;行走速度;喷灌强度;均匀度;土壤含水率

中图分类号: S277.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-8530(2014)07-0625-06

张以升,朱德兰,张林,等. 平移式喷灌机行走速度及喷灌均匀度试验研究[J]. 排灌机械工程学报,2014,32(7): 625-630.

Zhang Yisheng, Zhu Delan, Zhang Lin, et al. Study on translocating speed and water distribution uniformity of lightweight lateral move irrigation system[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering(JDIME), 2014, 32(7): 625-630. (in Chinese)

Study on translocating speed and water distribution uniformity of lightweight lateral move irrigation system

Zhang Yisheng^{1,2}, Zhu Delan^{1,2}, Zhang Lin¹, Gong Xinghui^{1,2}

(1. Institute of Water-saving Agriculture in Arid Areas of China, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In order to identify a reasonable translocating speed of lateral irrigation system and effects of water distribution uniformity on soil water content under a low operating pressure, a relationship between operating pressure and translocating speed at a rated irrigation quota is established through indoor and field experiments by employing the lightweight lateral move irrigation system developed in house, in addition, the variations in water distribution and uniformity as well as soil water content uniformity are analyzed in terms of time. It is clear that the relationship can estimate the translocating speed and operating pressure accurately under a given irrigation quota. The lowest and highest translocating speeds are 17.27, 58.65 m/h under 40-120 kPa operating pressure at 10, 15 and 20 mm irrigation quotas, respectively. An increasing operating pressure can improve water distribution uniformity slightly, for instance the uniformity is 0.696 for 40 kPa operating pressure, but for 60-120 kPa pres-

收稿日期: 2013-06-27; 网络出版时间: 2014-07-15

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.3969/j.issn.1674-8530.13.0160.html>

基金项目: 教育部、国家外专局 111 计划项目(B12007); 国家工程技术研究中心再建项目(2011FU125Z27-1); 西北农林科技大学科技创新专项(Z109021207)

作者简介: 张以升(1988—),男,河南商丘人,硕士研究生(hnsqzys@163.com),主要从事灌溉排水新技术研究.

朱德兰(1969—),女,陕西杨凌人,教授,博士生导师(通信作者,dlzhu@126.com),主要从事节水灌溉理论与新技术研究.

sure it is increased to 0.731–0.788. Note that the water distribution uniformity is quite better in soil than on land surface at low working pressure. Particularly, the soil water content uniformity is 0.906 after 6 h since irrigation, but it can be as high as 0.953 after 24 h under 40 kPa working pressure. This suggests that the design specification on water distribution uniformity can be loosened properly by moving the irrigation system faster to reduce operating cost and energy consumption.

Key words: lightweight lateral move irrigation systems; moving speed; irrigation efficiency; uniformity; soil water content

高压喷灌耗能较多,在能源日益紧张的情况下,喷灌应向低压、低能耗、提高喷灌质量方向发展.轻小型平移式喷灌机具有工作压力小、能耗低、喷灌均匀度易控制等优点,在我国农田灌溉中适用性较强.喷灌水量和喷灌均匀度是评价喷灌质量好坏的重要标准,在设计喷灌机时一般要考虑这 2 个因素.文献[1]研究表明平移式喷灌机灌水量受喷灌机行走速度、工作压力等因素制约,在给定工作压力下,灌水量与行走速度成反比.

仵峰等^[2]通过分析国内喷灌发展中存在的问题,研制出了低能耗低压可调幅式喷灌机.涂琴等^[3]在对轻小型移动式喷灌机性能试验中探究了喷头对喷灌机水量分布的影响.此类研究^[4–6]多是通过分析轻小型平移式喷灌机喷灌的水力特性,提高喷灌均匀度,而对平移式喷灌机的行走速度未作详细探讨.李小平^[7]分析了固定式喷灌均匀度叠加方法,并对喷灌水的空间分布特性进行了研究,但对行喷式喷灌研究较少.范永申等^[1]通过对喷灌和软管灌溉两用机试验研究,得出了低能耗平移式喷灌机行走速度与灌水量、喷灌机流量之间的关系,并对水量分布和喷灌均匀度进行了分析,但没有分析水在土壤中的二次分布;由于作物可吸收的水分根区土壤中水分,因此研究喷灌均匀度对土壤水分二次分布均匀度的影响有重要意义.我国《喷灌工程技术规范》规定喷灌均匀度不应低于 75%^[8],行喷式喷灌均匀度不应低于 85%.早期研究^[9–10]显示,喷灌水在土壤中扩散较为均匀,近年来国内外学者^[11–13]通过田间试验,证实喷灌水分在土壤中的二次分布使得土壤水分均匀度远大于喷灌均匀度,说明在工程设计确定喷灌允许均匀度时,应考虑水分在土壤中的再分布.

文中对 Nelson D3000 蓝色折射式喷头进行室内试验,研究喷头喷洒特性,将该喷头配置于自主研发的轻小型平移式喷灌机,推导不同灌水定额下的喷灌压力与行走速度的关系式.并通过田间试验,分析此喷灌机在不同工作压力下水量分布特

性、喷灌均匀度和土壤含水率均匀度变化等指标.

1 试验方法

喷灌机所采用的喷头为 Nelson D3000 蓝色圆盘折射式喷头,喷嘴直径为 7.2 mm,单喷头试验在陕西杨凌中国旱区节水农业研究院灌溉水力厅进行,试验设置 30, 50, 100, 120, 130, 150, 180, 200, 230, 250 kPa 共 10 个目标压力,称重法测量 30 s 时间内喷头洒水的重量,每个压力重复 3 次求平均值.

喷灌试验在陕西杨凌中国旱区节水农业研究院小麦试验田进行,试验田土壤为黏土,土壤容重为 1.42 g/cm³.试验过程中平均气温为 6 ℃,平均风速为 1.2 m/s,风向为西南风.试验所采用的喷灌机为西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院自行研制的轻小型平移式喷灌机,喷灌机的跨度为 24 m,喷头间距为 3 m,喷头距地面高 1.2 m,喷头上方安装有压力表(西安仪表厂 YB-150).试验过程中喷灌机行走速度为 30 m/h.采用称重法测喷洒水量,雨量筒直径为 9.72 cm;用 TDR (BWT2TRASE 6050X1)测 15 cm 土壤含水率.

在喷灌机单侧喷灌区域布设雨量筒,喷灌机行走方向上布设 3 排,每排间距为 1 m,雨量筒间距为 0.5 m,如图 1 所示.

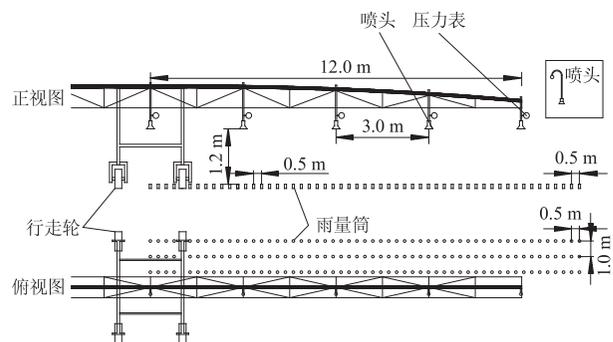


图 1 喷灌试验示意图

Fig. 1 Schematic of sprinkler irrigation

雨量筒将试验区域分割成 0.5 m × 1.0 m 网格

状小区,用 TDR 测量每一小区中心点 15 cm 的土壤含水率.

大田试验设置 40,60,80,100,120 kPa 共 5 个喷灌压力,完成喷洒后,采用称重法测量喷头喷洒水的重量,取喷灌机行走方向上 3 个测点水量的平均值作为该点的喷水量.在喷灌后 6 h 和 24 h 利用 TDR 测量土壤含水率,取喷灌机行走方向上的平均值作为该点的土壤含水率.

2 结果与分析

2.1 喷灌机行走速度

在压力一定的情况下,喷灌机喷幅和喷灌机出流量为定值,此时行喷式喷灌机行走速度对平均灌水量有直接的影响.喷灌机在一段时间内的灌水量可按式(1)计算,即

$$M = Qt = nqt, \quad (1)$$

式中: M 为 t 时间段内喷洒水量, m^3 ; Q 为喷灌机出流量, m^3/h ; t 为灌溉持续时间, h ; n 为喷头个数; q 为单喷头流量, m^3/h .

喷灌机在 t 时段内的喷洒面积为

$$S = S_L vt, \quad (2)$$

式中: S 为喷灌面积, m^2 ; S_L 为喷灌机喷幅, m ; v 为喷灌机行走速度, m/h .

当喷灌机出流量一定时,喷灌机所控制喷洒地块平均接收水量与速度成反比.文中研究喷灌机跨度较小,所配置喷头型号相同,因此当喷灌机稳定工作时,各喷头实际工作压力基本相同,其平均灌水量为

$$m = \frac{M}{S} = \frac{1\ 000nq}{S_L v}, \quad (3)$$

式中: m 为喷灌机一次灌水量, mm .

单喷头流量随压力的变化而改变,如图 2 所示,其中 p 为喷头入口压力.

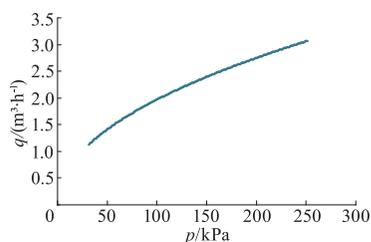


图 2 压力流量关系曲线图

Fig. 2 Relationship between pressure and flow rate

对室内试验采集的数据进行回归分析,得出单喷头压力流量关系式为

$$q = 0.214\ 2p^{0.481\ 8}, R^2 = 0.999\ 8. \quad (4)$$

由式(3),(4)可得该喷灌机一次灌水量计算公式为

$$m = \frac{214.2np^{0.481\ 8}}{S_L v}. \quad (5)$$

文中喷灌机行走速度为 30 m/h,40 ~ 120 kPa 压力下喷灌机喷幅变化范围为 29 ~ 35 m,喷头数为 9 个,将式(5)计算得到喷灌机喷水量与雨量筒实测得到的喷水量对比,结果如表 1 所示,其中 p_w 为工作压力, m_a 为平均灌水量, v_c 与 v_e 分别为计算值和实测值, σ 为相对误差,从表中可以看出,在相同行走速度时灌水量随压力增大而增大,试验值和实测值相对误差小于 5%.

表 1 灌水量计算值与实测值对比
Tab. 1 Comparison of calculated and measured irrigation quota

p_w/kPa	m_a/mm		$\sigma/\%$
	v_c	v_e	
40	12.668	12.233	3.6
60	15.400	15.824	2.7
80	17.690	17.273	2.4
100	19.698	19.821	0.6
120	21.506	21.657	0.7

利用 Spss 软件对表 1 数据进行配对样本 T 检验,检验结果显示两尾检验差异水平 sig 为 0.865,大于 0.500,计算值与实际值差异性不具有统计学意义,说明计算值较为准确.对式(5)进行变化,可得在灌水定额一定的条件下,喷灌机行走速度计算公式为

$$v = \frac{214.2np^{0.481\ 8}}{S_L m}. \quad (6)$$

式(6)为灌机行走速度与压力、灌水定额关系式.从式中可以得出,当喷头个数、喷灌压力以及灌水定额等条件给定后,喷灌机行走速度为定值.利用式(6)计算该喷灌机不同工作压力下,10,15 和 20 mm 灌水定额时的移动速度,如表 2 所示,其中 M_n 为灌水定额.

表 2 不同工况下喷灌机的行走速度
Tab. 2 Translocating speed of irrigation system under various operating conditions

M_n/mm	$v/(m \cdot s^{-1})$				
	$p_w = 40$	$p_w = 60$	$p_w = 80$	$p_w = 100$	$p_w = 120$
10	34.55	42.00	48.25	53.72	58.65
15	23.03	28.00	32.16	35.81	39.10
20	17.27	21.00	24.12	26.86	29.33

2.2 喷灌水量分布

2.2.1 地表喷洒水量分布规律

在 40,60,80,100 和 120 kPa 等 5 个压力水平

下,行走方向三测点求平均得出距离喷灌机不同位置处的喷水量分布如图 3 所示,其中 L 为距离喷灌机中心点的长度, M_p 为喷水量。

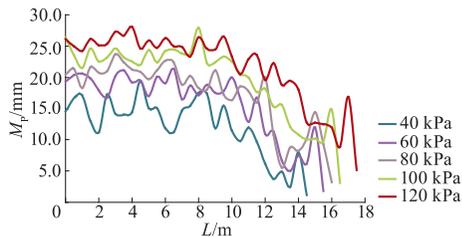


图 3 水量分布与压力关系图

Fig. 3 Relationship between water distribution and working pressure

从图 3 可以看出,距离喷灌机中心越远,喷水量总体有减小趋势,不同压力下水量分布趋势变化基

本一致;喷灌机中心位置处水深变化值不大,在靠近喷洒支管外端处喷洒水量显著降低,喷灌支管最外端第 2 个测量点,喷灌水量较大.在 40 kPa 工作压力下,降水量变化较为剧烈,水量降低拐点为喷灌支管 10 m 处;当工作压力大于 80 kPa 时,降水量变化幅度相对较小,距喷灌中心点 12 m 处,喷灌水量开始降低;120 kPa 工作压力下水量分布最为均匀,水量降低位置在距中心点 13 m 处。

利用 Spss 软件对地面喷灌试验数据进行统计量分析,地面喷灌 Frequencies 统计特征结果见表 3,其中, Y 为样本数, μ_1 为喷灌水量均值, μ_s 为均值标准误, M_1 为中位数, s 为标准差, D 为方差, SK 为偏度系数, CK 为峰度系数, M_{max} 为水量最大值, M_{min} 为水量最小值, l 为全距, CV 为变形系数。

表 3 地面喷灌 Frequencies 统计特征表
Tab. 3 Statistical characteristics in frequency of land surface sprinkler irrigation

p_w/kPa	Y	μ_1/mm	μ_s	M_1/mm	s	D	SK	CK	M_{max}/mm	M_{min}/mm	l	CV
40	90	12.23	0.87	13.52	4.74	22.48	-0.85	0.03	19.40	1.21	18.19	0.39
60	96	15.82	0.94	17.69	5.33	28.40	-1.25	0.52	21.33	1.75	19.58	0.34
80	99	17.27	0.94	18.81	5.41	29.30	-1.19	0.41	23.66	3.19	20.48	0.31
100	102	19.82	1.00	22.45	5.85	34.18	-1.17	0.66	27.98	3.14	24.83	0.29
120	118	21.66	0.96	24.34	5.74	32.99	-1.34	0.97	28.02	5.16	22.86	0.27

从表 3 中可以看出,压力升高时均值增大,表明平均灌水量随压力升高而增大.偏度系数小于 0,峰度系数大于 0,表示负偏差值较大,该分布为尖峰左偏分布.方差与全距随压力的上升而增大,反映了数据离散趋势增强;40 kPa 压力下,最小喷灌水量为 1.21 mm,最大为 19.40 mm,变异系数为 0.39,表明该压力下不同位置喷灌水量相对较低,而各测量点数据变化幅度较大;当工作压力达到 120 kPa 时,喷灌水量最小值和最大值都有所增大,全距较 40 kPa 增大,而变异系数为 0.27,说明测量点喷灌水量较高,但变化幅度不大。

2.2.2 喷后 6 h 土壤含水率分布规律

停止喷洒 6 h 后,测定地面下 0 ~ 15 cm 土壤平均含水量,不同位置处的土壤含水率见图 4,其中 θ 为土壤含水率.由图 4 可以看出,停止喷灌 6 h 后,不同位置处土壤含水率变化幅度较小,在较高的压

力下土壤水分分布趋于均匀.在 40 kPa 工作压力下,土壤含水率最低与最高值为 20.9% 和 32.2%,变幅较大,距喷灌中心点 11 m 处,土壤含水量开始降低;当工作压力分别为 60,80,100 kPa 时,土壤含水率变化范围依次减小;工作压力为 120 kPa 时,土壤含水率变化最小,在距离中心点 13 m 外,喷灌水降低较为明显(见图 3),而土壤含水量变化相对较小。

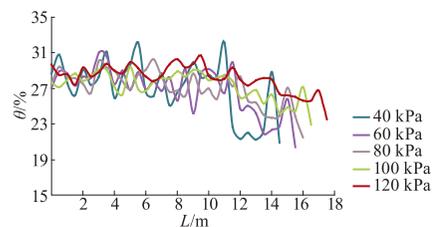


图 4 喷后 6 h 土壤含水率分布图

Fig. 4 Soil water content distribution after 6 h since irrigation

表 4 为 6 h 土壤含水率统计特征表。

表 4 6 h 土壤含水率 Frequencies 统计特征表
Tab. 4 Statistical characteristics in frequency of soil water content after 6 h since irrigation

p_w/kPa	Y	μ_2/mm	μ_s	$M_2/%$	s	D	SK	CK	$\theta_{max}/%$	$\theta_{min}/%$	l	CV
40	90	27.09	0.59	28.03	3.21	10.29	-0.59	-0.43	32.17	20.87	11.30	0.12
60	96	26.90	0.46	27.42	2.60	6.75	-0.79	0.12	31.07	20.40	10.67	0.10
80	99	27.07	0.35	27.20	2.02	4.08	-0.78	0.50	30.27	21.50	8.77	0.07
100	102	27.31	0.27	27.78	1.57	2.46	-1.02	0.73	29.47	22.90	6.57	0.06
120	118	28.19	0.25	28.35	1.51	2.28	-0.98	1.32	30.70	23.53	7.17	0.05

由6 h土壤含水率统计特征表可以看出,土壤含水率的均值变化范围为26.90%~28.19%,变幅相对较小,表明不同喷灌压力下土壤含水率值相对集中.标准差与全距随压力的增大而减小,数据离散趋势减弱.当喷灌压力小于60 kPa时,土壤含水率变异系数属中等变异.

2.2.3 喷后24 h土壤含水率分布规律

图5为喷后24 h土壤含水率分布图.从图中可以看出同一压力下土壤含水率变化较小,由此推出24 h后水分在土壤中得到充分扩散.在40 kPa喷灌压力下,土壤含水率变化幅度相对较大,而相比喷灌后6 h(见图4)有明显改善,距中心点11 m外土壤含水率降低值不明显;土壤水分在二次分布过程

中受重力势和土壤基势双重作用,在60~120 kPa时,土壤含水率变幅最小,而在喷灌支管最外端,受喷灌水量分布的影响,土壤含水率相对较小.

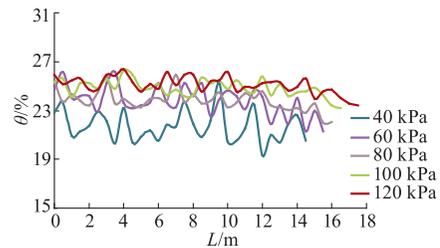


图5 喷后24 h土壤含水率分布图
Fig. 5 Soil water content distribution after 24 h since irrigation

表5为24 h土壤含水率统计特征表.

表5 24 h土壤含水率 Frequencies 统计特征表
Tab. 5 Statistical characteristics in frequency of soil water content after 24 h since irrigation

p_w/kPa	Y	μ_3/mm	μ_s	M_3/mm	s	D	SK	CK	M_{max}/mm	M_{min}/mm	l	CV
40	90	21.72	0.24	21.62	1.31	1.71	0.70	0.44	25.27	19.33	5.93	0.06
60	96	23.82	0.22	23.95	1.23	1.52	-0.22	-0.02	26.17	21.27	4.90	0.05
80	99	23.83	0.15	23.73	0.86	0.74	0.45	1.23	25.97	21.97	4.00	0.04
100	102	24.89	0.12	24.91	0.71	0.50	-0.22	0.43	26.53	23.15	3.38	0.03
120	118	25.12	0.12	25.20	0.72	0.52	-0.41	-0.07	26.40	23.43	2.97	0.03

由表5可知,标准差随压力的增大不断减小,样本之间的差异性降低,均值代表性较强.土壤含水率全距变化范围为2.97~5.93,变化幅度相比喷后6 h明显减小,表明样本数据集中趋势较为明显.土壤中的水分经过充分入渗,土壤含水率样本均值相比喷后6 h有所减小,40 kPa工作压力下降幅最大.不同压力下土壤含水率变异系数小于10%,属于弱变异.

2.3 喷灌及土壤含水率均匀度分析

利用克里斯琴森公式计算喷灌均匀度和土壤含水率均匀度,即

$$Cu = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n_s} |x_i - \bar{x}|}{n\bar{x}}, \quad (7)$$

式中: n_s 为总测点个数; x_i 为第*i*个测点降水量; \bar{x}

$$\text{为 } n_s \text{ 个雨量筒平均水深, } \bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{n_s} x_i}{n}.$$

通过分析得出喷灌与土壤含水率均匀度变化图如图6所示.从图中可以看出,在40~120 kPa工作压力下喷灌均匀度以及土壤水分分布均匀度变化趋势基本相同,均随压力的增大而增大;同一压力下喷灌均匀度、6 h土壤含水率均匀度和24 h土

壤含水率均匀度依次增大.

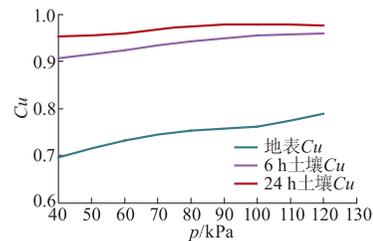


图6 地表及土壤含水率均匀度图
Fig. 6 Soil water content uniformity in soil and on land surfaced

当工作压力为40 kPa时, Cu 值为0.696,喷灌均匀性较差,经土壤二次分布后水量分布均匀性显著提高,6 h和24 h后分别达到0.906和0.953;80 kPa工作压力下 Cu 值为0.754,6 h和24 h后土壤含水率分布均匀度分别达到0.942和0.974;120 kPa较40 kPa工作压力下喷灌均匀度,6 h土壤含水率均匀度和24 h土壤含水率均匀度相对变化值分别为13.3%,5.9%和2.6%,可以看出压力由40 kPa增大到120 kPa后,喷灌均匀度相对变化值略大,而土壤含水率均匀度相对变化较小.由于作物能够直接吸收利用的水分为根区土壤中水分,提高土壤含水率均匀度为喷灌最终目标,在40 kPa喷灌压力喷灌均匀度较低,而水分在土壤中通过再分布达到较理想的均匀度,能够被作物有效利用.

3 结 论

1) 通过分析,提出了喷灌机行走速度与灌水定额、工作压力的公式. 在灌水定额已知时,计算出了给定压力下喷灌机的行走速度.

2) 不同压力下水量分布趋势较为一致,在靠近喷洒支管外端处喷洒水量显著降低;受喷灌水量分布影响,喷后 6 h 在喷洒支管外端土壤含水率分布有所降低;喷灌水量分布对 24 h 后土壤含水率分布影响不明显.

3) 田间试验表明在较小的工作压力下,喷灌均匀度较低,水分在土壤中进行再分布后能够达到较高的均匀度,而作物能够有效吸收根区土壤中的水分,可以降低喷灌均匀度设计值以降低运行成本,节约能耗.

参考文献 (References)

- [1] 范永申,黄修桥,仵峰,等. 喷灌和软管灌溉两用机组水量分布特性与试验[J]. 农业机械学报, 2009, 40(11): 74 - 77.
Fan Yongshen, Huang Xiuqiao, Wu Feng, et al. Experiment and analysis on water distribution uniformity of machine of sprinkling irrigation and hose irrigation dual purpose [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(11): 74 - 77. (in Chinese)
- [2] 仵峰,范永申,宰松梅,等. 低压可调幅式喷灌机研制[J]. 节水灌溉, 2004(3): 16 - 17.
Wu Feng, Fan Yongshen, Zai Songmei, et al. Manufacture of sprinkling irrigation machine with low water pressure and adjustable spraying range[J]. Water Saving Irrigation, 2004(3): 16 - 17. (in Chinese)
- [3] 涂琴,李红,蔡彬. 轻小型移动式喷灌机组配套及性能试验[J]. 节水灌溉, 2010(11): 59 - 61.
Tu Qin, Li Hong, Cai Bin. Small size movable sprinkler irrigation set configuration and performance experiment [J]. Water Saving Irrigation, 2010(11): 59 - 61. (in Chinese)
- [4] 韩文霆. 喷灌均匀系数的三次样条两次插值计算方法[J]. 农业机械学报, 2008, 39(10): 134 - 139.
Han Wenting. Calculation of sprinkler irrigation uniformity by double interpolation using cubic splines and linear lines [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(10): 134 - 139. (in Chinese)
- [5] Yacoubi S, Zayani K, Slatni A, et al. Assessing sprinkler irrigation performance using field evaluations at the medjerda lower valley of Tunisia[J]. Engineering, 2012 (4): 682 - 691.
- [6] Sanchez I, Zapata N, Faci J M. Combined effect of technical, meteorological and agronomical factors on solid-set sprinkler irrigation: II. Modifications of the wind velocity and of the water interception plane by the crop canopy [J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(10): 1591 - 1601.
- [7] 李小平. 喷灌系统水量分布均匀度研究[D]. 武汉: 武汉大学水利水电学院, 2005.
- [8] 中华人民共和国建设部. GB/T 50085—2007 喷灌工程技术规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2007.
- [9] Stern J, Bresler E. Nonuniform sprinkler irrigation and crop yield [J]. Irrigation Science, 1983, 4(1): 17 - 29.
- [10] Li J, Kawano H. The areal distribution of soil moisture under sprinkler irrigation [J]. Agricultural Water Management, 1996, 32(1): 29 - 36.
- [11] Chen J Y, Tang C Y, Sakura Y, et al. Measurement and analysis of the redistribution of soil moisture and solutes in a maize field in the lower reaches of the Yellow River [J]. Hydrological Processes, 2004, 18(12): 2263 - 2273.
- [12] Sanchez I, Zapata N, Faci J M. Combined effect of technical, meteorological and agronomical factors on solid-set sprinkler irrigation: I. Irrigation performance and soil water recharge in alfalfa and maize [J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(10): 1571 - 1581.
- [13] Ortiz J N, De Juan J A, Tarjuelo J M. Analysis of water application uniformity from a centre pivot irrigator and its effect on sugar beet (*Beta vulgaris* L.) yield [J]. Biosystems Engineering, 2010, 105(3): 367 - 379.

(责任编辑 谈国鹏)